

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ РАДИАЦИОННО- КОНВЕКТИВНОГО ТИПА ДЛЯ ПЕЧИ ТЕПЛООВОГО ОБЕЗЖИРИВАНИЯ СТЕКЛОСЕТКИ

Зайнуллин Л.А.<sup>1</sup>, Калганов М.В.<sup>1</sup>, Калганов Д.В.<sup>1</sup>, Бычков С.А.<sup>2</sup>

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»),  
г. Екатеринбург, Россия, [aup@vniimt.ru](mailto:aup@vniimt.ru)

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Аннотация** – Разработан, исследован и изготовлен электронагреватель с радиационно-конвективным способом теплообмена внутри его герметичного корпуса. Расчетами показано, что применение дополнительного отвода тепла от проволочных спиралей нагревателя за счет обдувки их потоком теплоносителя (воздуха) в замкнутом циркуляционном контуре позволяет повышать ресурс работы устройства на 25-30% за счет снижения рабочей температуры этих тепловыделяющих поверхностей (электроспиралей).

**Ключевые слова** – электронагреватель, тепловое обезжиривание стеклосетки, радиационно-конвективный теплообмен.

В ОАО «ВНИИМТ» в 2013 г. была разработана, изготовлена и поставлена на ОАО «Синарский трубный завод» печь теплового обезжиривания стеклосетки типа ССФ-4. Полотно обработанной стеклосетки используется в качестве тепловой изоляции при производстве двухслойных лифтовых труб, применяемых в газонефтедобыче.

Исходный материал стеклосетки содержит до 2% по массе смесь предельных углеводородов (парафинов) в твердой фазе с химсоставом:  $C_8H_{18} - C_{35}H_{72}$ . Технология обезжиривания стеклосетки предусматривает нагрев ее до 400 °С с последующей выдержкой в течение 6 часов, при этом, парафин расплавляется, испаряется, смешивается с воздухом, загрязняя его и в газообразном состоянии удаляется за пределы печи.

Кроме того, при проведении обезжиривания стеклосетки имеет место процесс пиролиза парафинов с выделением углерода в твердой фазе (сажи) и осаждением его на элементах электронагревателей, что значительно увеличивает вероятность короткого замыкания и выхода из строя этого устройства.

С целью повышения надежности работы печи обезжиривания стеклосетки было принято решение о разработке электронагревателей закрытого типа, защищенных от воздействия продуктов пиролиза парафинов. Известны электронагреватели закрытого типа [1,2,3], применяемые, например, в протяженных печах для термообработки полосы и сортового проката в защитной атмосфере. Существенный недостаток этих устройств заключается в том, что теплообмен между поверхностями электроспиралей и внутренней стенкой газоплотного корпуса происходит в основном за счет

теплового излучения, при этом рабочая температура спиралей может достигать предельно допустимых значений (свыше 1100 °С), что значительно снижает ресурс их работы.

Для уменьшения рабочей температуры электроспиралей нагревателя закрытого типа, повышения эффективности и надежности его работы была разработана схема устройства, где реализуется радиационно-конвективный способ передачи тепла от спиралей к теплообменнику и стенкам герметичного корпуса, рис. 1.

Система уравнений, описывающая теплообмен внутри рассматриваемого нагревателя имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma} &= Q_r + Q_c \\ Q_r &= \varepsilon_{np} \cdot F_n \cdot \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right] \\ Q_c &= \alpha_1 \cdot F_n \cdot [t_n - 0.5(t_{c1} + t_{c2})] \\ Q_c &= \alpha_2 \cdot F_m \cdot [0.5(t_{c1} + t_{c2}) - t_{cm}] \\ Q_c &= V_c \cdot \rho_c \cdot C_c \cdot (t_{c2} - t_{c1}) \end{aligned} \quad (1)$$

- где
- $Q_{\Sigma}$  – электрическая мощность, выделяемая на спираль, Вт;
  - $Q_r$  – лучистый тепловой поток от спиралей к теплообменнику и стенкам корпуса, Вт;
  - $Q_c$  – тепловая мощность, переносимая теплоносителем, Вт;
  - $\varepsilon_{np}$  – приведенный коэффициент лучистого теплообмена,  $Вт/м^2 \cdot K^4$ ;
  - $F_n$  – площадь поверхности электроспиралей,  $м^2$ ;
  - $T_n$  – температура электроспиралей, К;
  - $T_{cm}$  – температура стенки корпуса электронагревателей, К;
  - $\alpha_1$  – коэффициент конвективной теплоотдачи от спиралей к теплоносителю,  $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ ;
  - $t_{c1}$  – температура теплоносителя на входе в нагреватель,  $^\circ C$ ;
  - $t_{c2}$  – температура теплоносителя на входе в теплообменник,  $^\circ C$ ;
  - $\alpha_2$  – коэффициент конвективной теплоотдачи от теплоносителя к поверхности теплообменника,  $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ ;
  - $F_m$  – площадь теплообменника,  $м^2$ ;
  - $V_c$  – производительность высокотемпературного вентилятора,

$\rho_2$  - средняя плотность теплоносителя,  $\text{кг/м}^3$   
 $C_2$  - средняя удельная теплоемкость теплоносителя,  $\text{Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ .

На рис. 2 приведены результаты расчетов теплообмена внутри описываемого электронагревателя. Из анализа полученных данных следует, что при постоянной электрической мощности, например, 30 кВт, рабочая температура спиралей существенно снижается при увеличении производительности вентилятора, обеспечивающего перенос тепла конвективным способом, то есть обдувкой спиралей теплоносителем.

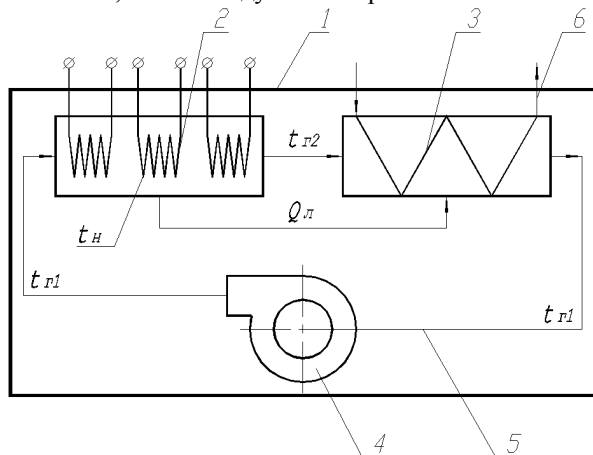


Рис. 1. Схема теплообмена в электронагревателе закрытого типа с радиационно-конвективным способом передачи тепла от спиралей к корпусу.

1 - Герметичный защитный корпус нагревателя; 2 - Электроспираль; 3 - Трубчатый теплообменник; 4 - Вентилятор; 5 - Подводящие и отводящие каналы; 6 - Нагреваемый «загрязненный» воздух. Обозначения:  $t_{r1}$  - температура теплоносителя (воздуха) на входе в нагреватель;  $t_{r2}$  - температура теплоносителя на входе в теплообменник;  $Q_{\pi}$  - лучистый тепловой поток от спиралей;  $t_n$  - температура электроспиралей.

Так, например, в наиболее тяжелом режиме работы при температуре стенок корпуса теплообменника и корпуса нагревателя в  $500^\circ\text{C}$  увеличение производительности вентилятора с 0.2 до  $1 \text{ м}^3/\text{с}$  приводит к снижению температуры спиралей с  $1060^\circ\text{C}$  до  $880^\circ\text{C}$ , то есть на  $180^\circ\text{C}$ , что эквивалентно увеличению их срока службы на 25-30 %. Эффективность работы электронагревателя при этом существенно повышается. В начальный период нагрева стеклосетки, когда стенки корпуса и теплообменника равны  $20^\circ\text{C}$  увеличение производительности вентилятора в тех же пределах приводит к снижению температуры в 1.7 раза с  $970^\circ\text{C}$  до  $580^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 представлена конструкция нового электронагревателя, изготовленного в металле. Техническая характеристика устройства приведена в табл. 1.

Электронагреватель состоит из следующих основных частей: корпуса 1, подвесной системы крепления проволочных спиралей 2 и циркуляционного вентилятора 3 специального исполнения с вертикальным

расположением вала. Корпус нагревателя состоит из несущего фланца 4 с теплоизоляционным слоем 5, верхнего 6 и нижнего 7 перепускных коробов, трубчатого теплообменника 8, встроенного спирального корпуса вентилятора 9.

Теплообмен внутри нагревателя осуществляется следующим образом. Электрическая мощность, выделяемая в виде тепла в проволочных нихромовых спиралях, переносится внутри корпуса нагревателя двумя способами.

Таблица 1.

Наименование показателя	Ед. изм	Значение
1 Максимальная электрическая мощность нагревателя	кВт	55
2 Электрическая мощность одной фазы	кВт	18.3
3 Количество фаз	шт	3
4 Электрическое сопротивление одной фазы	Ом	2.64
5 Материал проволоки спирали		X20H80
6 Диаметр проволоки	мм	5.5
7 Максимальная температура теплоносителя, циркулирующего внутри нагревателя	$^\circ\text{C}$	650
8 Число оборотов рабочего колеса вентилятора	Об/мин	1460
9 Электродвигатель вентилятора		
-тип		AIP100 L2Y3
-мощность	кВт	5.5
-число оборотов	Об/мин	2860
10 Тип клиновых ремней		A-1250
11 Вентилятор оборудован встроенной системой охлаждения вала.		

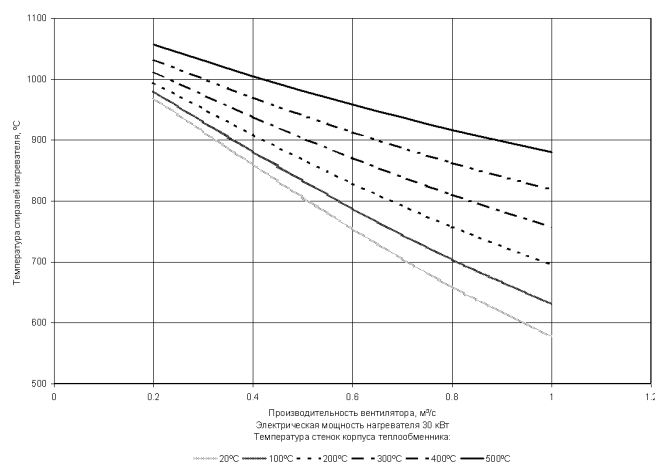


Рис. 2. Расчетные зависимости изменения температуры спиралей от производительности вентилятора электронагревателя закрытого типа с радиационно-конвективным способом теплообмена.

Одна часть теплового потока за счет излучения от спиралей передается на боковые стенки вертикальных каналов, которые снаружи обдуваются потоками

“загрязненного” воздуха. Другая часть теплового потока от спиралей передается конвекцией за счет обдувки их

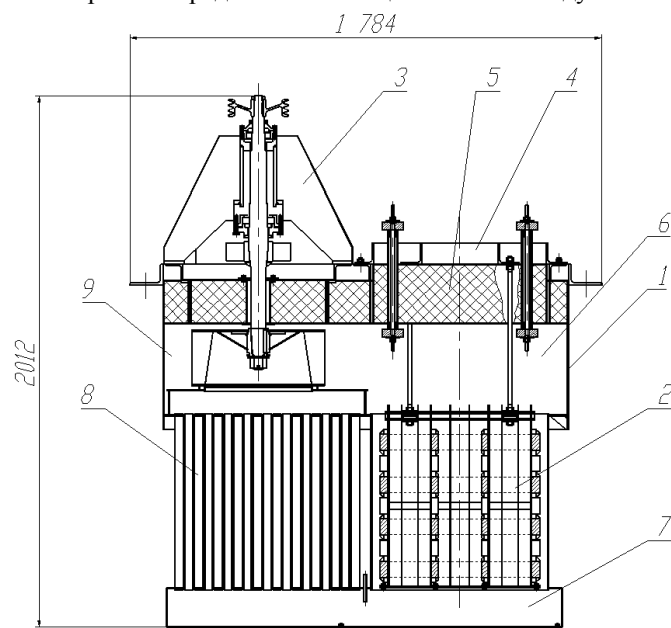


Рис. 3. Конструкция электронагревателя закрытого типа с радиационно-конвективным способом теплообмена.

1 – корпус; 2 – подвесная система крепления проволочных спиралей; 3 – циркуляционный вентилятор специального исполнения; 4 – несущий фланец; 5 – теплоизоляционный слой; 6 и 7 – верхний и нижний перепускные короба; 8 – трубчатый теплообменник; 9 – встроенный спиральный корпус вентилятора.

поверхности теплоносителем, движущимся внутри корпуса нагревателя, поддерживаемого работающим вентилятором.

Конвективный теплообмен реализован следующим образом. Выходя из встроенного спирального корпуса

вентилятора, этот поток через верхний перепускной короб поступает в три параллельно расположенных канала, где нагревается, обдувая проволочные спирали. Далее, по нижнему перепускному каналу, теплоноситель подается во внутрь трубочки теплообменника, отдавая тепло через стенки трубок внешнему “загрязненному” потоку воздуха. Охлажденный воздух за счет разрежения, создаваемого циркуляционным вентилятором, поступает на его вход для повторения этого теплообменного цикла.

Организация теплообмена внутри разработанного нагревателя описанным выше способом снижает рабочую температуру нагрева спиралей и способствует повышению ресурса их работы. Соотношение радиационной и конвективной составляющих общего теплового потока, отдаваемого электроспиральями согласно расчетных данных, достигает 1:1.

Таким образом, разработанная конструкция электронагревателя позволяет снизить рабочую температуру проволочных нагревателей на некоторых режимах работы печи почти в 1.7 раза и изолировать их поверхности от воздействия продуктов пиролиза парафинов, повышая тем самым ресурс работы разработанного нагревателя на 25-30% по сравнению с известными конструкциями.

#### 1. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фельдман И.А. Расчет и конструирование нагревателей электропечей сопротивления / Фельдман И.А., Гутман М.Б., Рубин Г.К., Шадрич Н.И.-м.: Книга по требованию. -2013.-108с.
2. Аптерман В.Н. Протяжные печи / Аптерман В.Н., Тымчак В.М.-М.: Металлургия. – 1969.-320с.
3. Тымчак В.М. Расчет нагревательных и термических печей. Справочное издание / Тымчак В.М., Гусовский В.Л.-М.: Металлургия.-1983.-480с.